

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 1)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

カメリン・オネスの超電導の発見以降、最初の 100 年が過ぎ去った。発見後、オネスはすぐに超電導体を用いて 10 T の磁場を発生できるコイルの製作を計画する。しかし小さな磁場と小さな電流によって、超電導状態はたやすく消えてしまうことを知ることになる。臨界磁場 H_c と臨界電流密度 J_c の発見である。超電導の歴史は、その後、マイスナー効果の発見、2 つの臨界磁場を持つ第二種超電導体の発見へと続いていく。多くの理論的な発展も同時になされた。最初にロンドン理論によるマイスナー効果の説明、続いてギンツブルグ・ランダウ理論によって第二種超電導体の説明が可能となり、超電導状態には量子力学が深く関わっていることが明らかになっていった。そして超電導の発見から半世紀近くを経て、超電導発現機構を明らかにした微視的理論の決定版、バーディーン、クーパー、シュリーファールによる BCS 理論が完成する。この理論は 20 世紀物性物理学の金字塔の一つであり、超電導開発を加速するとともに、素粒子物理学へも大きな影響を与えていくことになる。

高温超電導体の発見はそれからさらに 30 年近くたってからのことであった。幾多の技術的ブレークスルーを経て、高温超電導体の線材化は大きく発展した。現在では、液体窒素温度で動作可能な長尺線材が可能となっている。しかし、線材は要求される磁場と温度下において必要な J_c を提供しなければならない。そこで重要となるのが J_c の大きさを自在に制御できる人工ピン技術である。本連載では、この人工ピン技術についてやさしく解説してみたい。人工ピンの物理的な背景から製造技術に関わる近年の発展までカバーしていくことをめざしている。連載の内容は、①抵抗ゼロの起源、②渦糸の運動、③さまざまなピンニング機構、④粒界問題と人工ピンの導入、⑤人工ピンの材料科学、そして⑥人工ピンの線材への展開、等々である。

それではまず、抵抗ゼロの起源からはじめよう。

2. 高温超電導体の意義

一般に銅やアルミに電流を流すと電気抵抗による熱損失が発生する。例えば銅線でコイルを作っても、磁場発生のために大電流を流せば発熱のために銅線が溶けてしまうこともある。これに対し超電導体は臨界温度 T_c 以下にまで冷却すると抵抗ゼロとなる。この状態で電流を流しても熱損失はほとんど発生しないので、超電導体で作った線材を束ねて抵抗ゼロの長距離送電ケーブルを作ることが可能となる。また同様に超伝導線材を用いてコイルを作り、ひとたびこれに電流を流せば永久に流れ続けるという現象も起こる (永久電流)。さらに、コイルの発生磁場は流す電流値に比例するので、大電流を流すことで超強力な磁場発生コイルにもなる。

1986 年にベドノルツとミュラーによって発見された高温超電導体は、沸点が 77 K (−196°C) の液体窒素に浸すと超電導状態になるという革新的な物質である。通常、従来型超電導体の冷却には液体ヘリウムが用いられていた。ヘリウムは地上では偏在しており希少で高価な物質であるが、窒素は空気中に無尽蔵に存在し、液体窒素の値段はミネラルウォーターなみと大変安い。高温超電導が普及すれば、液体窒素を用いて手軽に抵抗ゼロを利用できるようになるだろう。抵抗ゼロとな

る超電導材料を用いれば、熱損失によるエネルギーの無駄使いを大幅に減らすことができる。地球上のあらゆる国々でエネルギー消費が増えつつある 21 世紀においては、エネルギーの高効率利用は地球環境保護にも直結して大変重要だ。超電導体は本質的にエネルギー損失が極小であることから、この問題を解決する大きな可能性を秘めている。

3. 電気抵抗ゼロの起源

電気抵抗ゼロを示す超伝導現象にはミクロな粒子の運動を記述する量子力学が深く関わっている。ここでは量子力学に基づいて、抵抗ゼロの起源に関する考えをおさらいしよう。

1) ミクロな粒子と量子力学

超伝導現象の主役を担う電子は、粒子としての性質と波としての性質の両方を持ち量子力学の法則に従っている。波とみなした場合、電子は波動関数というもので表される。ここでスピンについて簡単に触れてみたい。ウーレンベックとハウスマットは 1925 年に、電子はつねに一定不変の速度で回転していると主張した。これは何らかの理由でたまたまスピン（回転）しているなじみ深い物体のスピンとは違って、電子のスピンは一時的な運動状態ではなく、質量や電荷のような固有な性質だ。この場合、電子は「スピン $1/2$ 」を持っているという。さらにスピンには上向き（+）と下向き（-）の 2 種類がある。 $1/2$ という大きさは大雑把に言って、粒子がどのくらい早く回転するかを示す量子力学的尺度だ。回転していない電子は電子ではない。

その後、他の物質を構成する粒子も電子と同様にスピン $1/2$ を持つことが明らかになった。一方、力を伝える光子、弱いゲージボソン、グルーオンなども固有のスピンを備えているが、その大きさは物質粒子の 2 倍の「スピン 1」を持つことが明らかになっている。量子力学によれば、スピンの半整数の粒子をフェルミ粒子、整数の粒子をボーズ粒子とよんで分類する。フェルミ粒子とボーズ粒子の振る舞いは大きく異なる。フェルミ粒子は同一箇所に二つの粒子が存在できないという特徴があるが、ボーズ粒子にはこの制限はない。我々の体はフェルミ粒子でできているが、体がつぶれてしまわないのはこの性質による。

複合粒子の場合は大変興味深い。この場合、フェルミ粒子が奇数個集まった場合はスピンの合計は半整数なのでやはりフェルミ粒子になるが、偶数個の場合はボーズ粒子になるのだ。例えばヘリウム 4 原子 (^4He) は中性子 2 個、陽子 2 個、電子 2 個を持つ原子なのでボーズ粒子になるが、同位体であるヘリウム 3 (^3He) は中性子 1 個、陽子 2 個、電子 2 個からなるのでフェルミ粒子となる。

2) ボーズ・アインシュタイン凝縮

金属の中の、アボガドロ数 (6.02×10^{23}) 個の電子のように、多数の粒子の集団の性質を調べる場合に量子力学に基づく量子統計が重要になるが、フェルミ粒子とボーズ粒子の統計には本質的に大きな違いがある。小さな箱の中に詰め込んだ多数のフェルミ粒子、例えば電子はパウリの排他律にしたがって反発しあうので一つのエネルギー準位を正負のスピンの向きを考慮しても 2 個までしか占められないのに対し、ボーズ粒子の場合はその様な事はなく同一のエネルギー準位を無制限に占めることができる。絶対零度におけるそれぞれの粒子のエネルギー分布を図 1 に示す。ボーズ粒子において、最低エネルギー状態に多数の粒子が落ち込んだ現象はボーズ・アインシュタイン凝縮とよばれる。同一のエネルギー準位を多

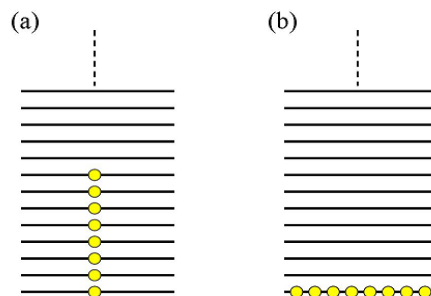


図 1 絶対零度におけるミクロ粒子のエネルギー準位分布図。(a)フェルミ粒子の場合。ひとつのレベルに、スピンの上向きと下向きの 2 個まで入ることができる。(b)ボーズ粒子の場合。最低レベルにすべての粒子が落ち込んでいる。

数の粒子が占めるということは、これら粒子が同一の運動量とエネルギーを持った波動関数を持つことを意味し、それらが位相をあわせて重なり合うことで巨視的波動関数というもので表される状態になっている。実際にボーズ粒子であるヘリウム 4 原子の集団（液体）は **2.2 K** で ボーズ・アインシュタイン凝縮を起こし、超流動とよばれる不思議な現象を引き起こす。このとき液体状のヘリウムの粘性は完全にゼロになる。

3) クーパー対の形成

さて、電子はフェルミ粒子であるので、小さな箱の中に多数の電子を詰めていくと最低エネルギー準位から高いエネルギー準位の広い範囲に分布し、全体のエネルギー状態も高くなってしまふ。しかし自然は低いエネルギー状態を好むので、何らかの方法で電子をボーズ粒子に変えることができれば、全体のエネルギー状態を下げるができる。

ここで、箱の中のアボガドロ数程度の多数の電子の中から、運動の方向は逆向きだけでも同じ運動量を持ちスピンの向きも逆である **2 個** の電子を選び出し、短い時間ではあるがペアを組ませたとする。ペアを結合させる引力は熱に弱いので温度が下がることによって初めてペアができるとしよう。先の議論からこの電子のペアは短時間の間はボーズ粒子として分類されることが分かる。アボガドロ数の電子の集団の中には条件を満たすものは無数にあるので、温度を下げることでこのような電子のペアは大量に形成されるはずだ。この電子のペアのことをクーパー対という。

個々のクーパー対は短時間でペアを解消し、またどこかでペアを組むということを繰り返すが、平均的には電子の集団の中に無数のクーパー対が同時に存在することになり、クーパー対の集団はある温度以下でボーズ・アインシュタイン凝縮を起こし、電子系はよりエネルギーの低い状態に移る。この温度が臨界温度 T_c である。クーパー対の集団は同一の波動関数を持つので、波動関数は位相を合わせて重なり合って巨視的な波動関数というものになる。この状態が超伝導状態だ。極めて量子力学的な状態だ。以上が **BCS** が示す超電導の起源である。これは先のヘリウム 4 の超流動状態とよく似ているが、ヘリウム原子は電荷を持たないのに対し、クーパー対は電荷を持っている。そのためヘリウム 4 では粘性がゼロになるのに対し、超伝導では電気抵抗ゼロの状態が現れてくるのだ。

以上が、ゼロ抵抗に関わる物理的な背景である。今回は、人工ピンにおいて重要な渦糸の運動について考える。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし（その 2）

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

超電導状態にある高温超電導線材は抵抗ゼロのまま大電流を流すことができる。このとき線材中にはクーパー対の集団が形成されており巨視的な波動関数で表される状態にある。超電導状態は液体ヘリウムにおいて生じる粘性のまったくない超流動状態によく似ているが、ヘリウム原子は電荷を持たないが、電子は電荷を持っているために抵抗なしで大電流を運ぶことができる。しかし大電流とはいうものの、線材に無制限に電流を流せるわけではない。抵抗なしの電流値には上限があるのだ。その上限を決めているのが今回の話題である“渦糸”の運動である。

2. 超電導現象とその波及

(1) 自発的な対称性の破れ

最近では科学の急速な発展に伴い宇宙の構成やその起源に関わる理解が進み、また新粒子発見への期待も高まって新聞紙面を飾ることも多い。CERN の LHC（スイス）という史上最大の素粒子加速器では、現代物理学の最高峰、標準理論の最後のピースであるヒッグス粒子（ヒッグス場）の発見が間近に迫っていると考えられている。LHC には多くの日本の先端技術が用いられており、その中心となる超電導線材や超電導コイル技術では日本企業の貢献も大変大きい。そしてこのヒッグス粒子および標準理論の成り立ちそのものにも超電導が果たした役割は極めて大きいのだ。

水は高温では気体であるが、温度を下げるにつれ液体そして固体になる。このように物質の相が温度に伴って変化することを相転移とよび、境目の温度を臨界温度 T_c とよぶ。超電導であれば高温相は常伝導状態であり、 T_c 以下の低温相は超電導状態である。常伝導状態では電子の運動はランダムであり特別な方向は存在せず対称的であるが、超電導状態は巨視的な波動関数で表される特別な秩序状態にあり対称性が破れている。超電導は自発的な（ゲージ）対称性の破れの最初の例である。

超電導に触発され 1960 年、南部陽一郎（2008 年ノーベル物理学賞）は真空すなわち見かけ上何もない宇宙も、超電導の電子の海のように何かが真空を埋め尽くし、その中で宇宙はうごめいていると説いた。その後、ヒッグスは超電導で起こるマクスナー効果との類推から真空は相転移によって南部の言うように対称性が破れており、そこではクーパー対の海のような秩序状態（ヒッグス場）が存在し、素粒子はヒッグス場との相互作用によって質量を獲得するとした。当時、素粒子の質量を説明することが困難だったがヒッグス場はこの状況を救い、ワインバーグらによって標準理論の根幹をなすものとして取り入れられていく。

(2) マクスナー効果の本質

ここで超電導に話を戻そう。超電導の特徴は抵抗ゼロとともにマクスナー効果を示すことはよく知られている。マクスナー効果は抵抗ゼロの完全導体の考えでは説明できず、超電導特有の反磁性の効果であることが分かっている。つまり、超電導体に磁場を印加すると、ロンドン侵入長 λ とよばれる短い深さの超電導体表面に抵抗ゼロの遮蔽電流が流れ、外部磁場を完全に排除するのだ。この状態は臨界磁場 (H_c) まで続き H_c で常伝導に転移する。このような超電導体のことを第一種超

電導体とよび、水銀や鉛がこれに相当する。ところがこれらに他元素を添加して合金化すると別種の超電導体に生まれ変わり、 H_c を超えた磁場中においても超電導が維持される。これは後述する第二種超電導体とよばれるものだ。

現代物理学では素粒子間に働く力は粒子のやりとりで説明される。電磁気力も電荷を持った物体どうしが仮想的な光子すなわち電磁場の量子をやりとりすることで生じる。光子は質量をもたないので遠くまで飛んでいくことができ、電磁気力はかなたまで届く。ところが超電導体の中ではマイスナー効果が働くため磁場はその内部深くまで侵入できない。これはあたかも電磁気力を伝える光子が超電導体の中では質量を持ち、遠くまで飛んでいくことができなくなったとも解釈できる。素粒子の一部が質量を持つのも、宇宙誕生後に真空が相転移を起こして対称性が破れ、超電導のような一種の秩序状態になっていると考えるのが現代物理学の解釈なのだ。

マイスナー効果、ギンツブルグ・ランダウ理論、BCS 理論と超電導の基本概念は物理の最先端領域に数々の影響を及ぼしてきた。宇宙が一種の超電導状態になっているなどなんとも壮大な話である。

3. 渦糸の形成

さて、風呂の栓を抜いたときやキッチンの流しで水の吸い込み口を見ていると、図 1 のような渦運動が起こる。中心に穴ができ、その周りに水が回転運動する。この種の渦のことを流体力学では渦糸とよび、中心の穴を芯とよぶ。

(このような渦は自然界にもたくさん見受けられる。鳴門海峡のうずしおや竜巻、台風、はては木星の大赤斑や渦巻銀河などがそれだ。) ボーズ・アインシュタイン凝縮した液体ヘリウム (超流体とよぶ) においてもこのような渦糸が生じると指摘したのは素粒子物理で有名なファインマンだ (1955 年)。液体ヘリウムからなる超流体は巨視的な波動関数で表される状態になっているので、水や台風などとはちがって渦の強さも量子化される。波動関数は位相と振幅を持った波なので、渦糸 (ヘリウム原子サイズの穴) の周りを一周したときぴたりと重ならない。

そのため位相の増加は 2π の整数倍に限られる。こうして超流体の中で生じる渦糸の強さも量子化され、ある最小単位のとびとびの場合に限られてしまうのだ。

ではなぜ渦糸が生じるのか? ここでドーナツ型の中空の容器に液体ヘリウムを入れ、適当な軸をつけてコマを作ったと考えよう。これを一定速度で回転させながら臨界温度以下に冷却してボーズ・アインシュタイン凝縮を起こさせ、その後モーターのスイッチを切ると容器そのものは停止するが、内部の超流体は粘性がないためいつまでも回り続ける (永久回転)。そこでさらに回転速度を高めてみよう。するとある一定の速度以上に達すると超流体中に渦糸が発生してくる。先に述べたように渦糸のまわりには超流体が環状に流れており、渦糸が量子化された一定の回転エネルギーを持つことが明らかだろう。これより、超流体全体の回転エネルギーがある一定値を超えると耐え切れなくなり、過剰な回転エネルギーが小さな渦糸の回転エネルギーに分断されその侵入が起こったものと考えられる。自然はエネルギーが低い状態を好むので、大きな永久回転として一生懸命耐えてエネルギーを上げるより、小さな渦糸の永久回転に分かれることで全体のエネルギーを下げたともいえるだろう。

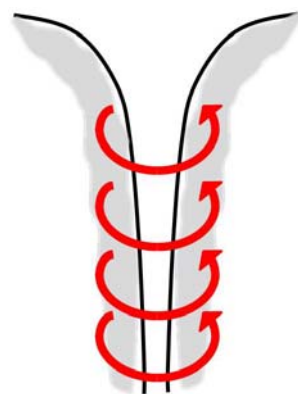


図 1 渦糸の芯とその周りの回転運動の模式図。

4. 超電導体における渦糸

相転移を起こして秩序状態にある超電導においても同様にして量子化された渦糸が発生する。ギ

ンツブルグ・ランダウ理論を基にして 1957 年に渦糸の存在を見事に示したのはアブリコソフであった（2003 年にギンツブルグとともにノーベル物理学賞）。渦糸の存在が許される超電導体を第二種超電導体とよぶ。ランダウ自身も超流動でノーベル賞を受賞しているが、その弟子であるアブリコソフがファインマンの渦糸の論文発表のはるか前に、超電導の渦糸の存在についてランダウに進言したとき、師の逆鱗にふれ論文を長く机の中にしまいこむ羽目になったという逸話がある。どうも論文の中でロンドン理論を引用したのが原因らしい。（ランダウはファインマンが大好きでロンドンが嫌いだったのだ。）しかし、その後ファインマンの渦糸のおかげで陽の目を見たアブリコソフの渦糸は、超電導の発展において大活躍することになる。

超電導の場合にコマの回転に相当するのは、お察しのとおり外部磁場である。大きな永久回転はマイスナー効果の部分に相当し、ある一定の回転速度とは下部臨界磁場 (H_{c1}) に相当する。この磁場を超えると超電導体は外部磁場の圧力に耐え切れず、磁場のエネルギーを下げるため小さな渦糸の侵入を許す。超電導の渦糸（図 2 参照）は渦のまわりにクーパー対からなる永久電流が λ の範囲で環状に流れている。しかし液体ヘリウムとの大きな違いは、クーパー対は電荷を持っており電流を運んでいるという点だ。このためこの環状電流によって超電導の渦糸には量子化された磁場が閉じ込められている。この磁場のことを磁束量子 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) とよび、渦糸のことを量子化磁束線ともよぶ。超電導の渦糸の芯にはクーパー対が存在せず常伝導状態の領域ができていると考えられ、芯の半径をコヒーレンス長 ξ とよんでおりその長さは絶対零度ではクーパー対の大きさにほぼ等しい。

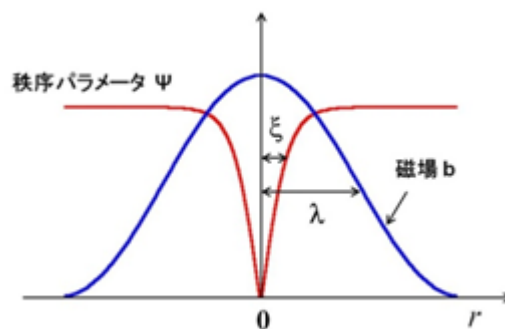


図 2 渦糸の内部構造。渦糸の芯の半径は ξ であり、 λ 程度の範囲に環状の永久電流が流れている。

クーパー対の海の中に渦糸が生じた状態を混合状態とよぶが、この状態は渦糸がぎっしりと詰め込まれ渦糸中の常伝導領域が重なるまで続く。このときの磁場を上部臨界磁場 (H_{c2}) とよびこの磁場で超電導状態は完全に壊れることになる。以上のことから短いコヒーレンス長を持つ超電導材料は低い H_{c1} と高い H_{c2} を持ち、極めて広範囲にわたって超電導状態を維持することができる。なお、渦糸は同じ向きの量子化された磁場を持つことからお互いに反発しあい、混合状態においては一般に三角格子（アブリコソフ格子ともよぶ）を組む。現在ではアブリコソフ格子はさまざまな方法によって可視化されている。各サイトに行けば渦糸運動の動画も楽しめる。[1\), 2\)](#)

5. 渦糸の運動と抵抗発生

通常、超電導線材は磁場中において使用される。そこで垂直磁場中におかれ混合状態にある超電導線材を考えよう。ここで線材に電流を流すと線材のまわりには電流の向きと右ねじの関係にある磁場が生じ、垂直磁場と重なって線材の片側の磁場が強くなる。各渦糸は磁束量子を持っているため、片側の磁場が強くなるということはその部分の渦糸密度が増大し、その反対側が疎な状態にあることを意味している。そのため電流と磁場の双方に垂直な方向へと渦糸を押しやって、渦糸分布を均一化しようとする力が働く。この力はローレンツ力とよばれ、単一渦糸に働く力は電流と磁束量子の積に比例した量である。

ローレンツ力によって渦糸は電流に対して横方向へ動こうとする。単一渦糸が一秒間当たり q 個の割合で電流を横切ると電流方向に $q\Phi_0$ の電圧が発生する。多数の渦糸が線材を横切るようになると電流方向の線材の両端には大きな電圧が現れ、あたかも有限の抵抗を持った状態になる。これを

磁束フロー状態という。この関係を渦糸の運動の速度 v と磁場 B で表せば $E=Bv$ の電場が発生する。こうして混合状態にある超電導体に電流を流すと、渦糸の運動に伴う抵抗が生じエネルギー損失が発生してしまうことが示される。

しかしながら、苦労して臨界温度の高い物質を見出し、長い時間をかけて線材開発し、電流を流してみたら渦糸の運動により抵抗発生してしまっって線材が使いものにならなかつたら大変困ったことである。したがって何としても渦糸の運動を止め、大電流を流しても抵抗発生のない線材に作り込む必要がある。それを可能とする技術が渦糸のピン止めである。そこでは小さな結晶欠陥たちが大活躍する。次回はこのピン止め技術について触れることにしたい。

参考文献：

1. <http://www.youtube.com/watch?v=TxVqO5zPmvU>

YouTube のサイトで日立のローレンツ顕微鏡による渦糸運動のビデオがみられる

2. <http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/groups/amks/superconductivity/sv/>

オスロ大学のサイト 磁気光学で見た渦糸運動のビデオがある

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 3)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

金属、半導体、セラミックスなどの物質群は一般に結晶とよばれる構造を持っている。結晶は原子や分子が空間的に繰り返しパターンを持って格子を組み、整然とならんでいる物質の状態のことだ。指先くらいの大きさの金属結晶の塊の中には 10^{23} 個という膨大な数の原子が詰め込まれている。原子が整然と並んで公園のジャングルジムのような構造を組み、無限に広がっているような状態を想像すればいい。超電導はこのような結晶の中に閉じ込められた電子の海の中で発生する現象だ。理想的な結晶ではどこまで行っても同じ構造パターンが現れ、電子の運動もこのパターンに追従する。しかし、もし結晶のどこかでその並び方に乱れが生じると電子の運動にも影響が出てくる。例えば結晶の乱れによって電子が局所的に散乱されたり、あるいは電子が流れることができないような領域が発生したりすると、その結果として超電導状態そのものにも空間的な不均一性が発生する。このような不均一性は超電導にとっては厄介者かもしれない。ところが渦糸のピン止めにおいては大変重要なものだ。

2. 対破壊電流、ピン止め

前回述べたように、渦糸（典型的には直径数 nm）の周囲には磁場侵入長 λ （典型的には数 10～150 nm）の範囲でクーパー対からなる永久電流が周回電流を作り磁場を閉じ込めている。渦糸の中心に近い所で最大の電流が流れ、中心から遠ざかるにつれて電流は小さくなっていく。ここで、最大の電流値のことを対破壊電流 (J_d) とよぶ。対破壊電流とはこれ以上流すと電流の力によってクーパー対が引きちぎられて超電導が壊れてしまうような電流値のことだ。その値は極めて大きく電流密度で 10^8 A/cm²（断面積 1 cm² 当たり数億アンペア）を超える。しかし、渦糸の周りには対破壊電流が流れているが、超電導線材の端から端にわたって対破壊電流を取り出すことにかつて成功したためしはない。そのはるか以前の小さな電流値で、ローレンツ力によって渦糸が動き出し抵抗が発生してしまうためだ。

実用超電導線材では電流密度 10^6 A/cm² が実用の目安と考えられており、これは直径が 0.1 cm の超電導電線に電流を流したとき、1 万アンペアまでゼロ抵抗を維持でき、それを超えると渦糸の運動によって抵抗が現れてしまうことを意味する。この場合、 10^6 A/cm² が臨界電流密度 (J_c) に相当する。抵抗が発生しないようにするためには、ローレンツ力によって渦糸が動かないように個々の渦糸を強くピン止めする必要がある。ピン止めとは文字通り採集した昆虫を虫ピンで標本箱にピンで止めるのと原理的には同じだ。しかし超電導渦糸はクーパー対の海の中に形成された量子力学的な渦だ。渦糸をピン止めする？ 超電導の場合の虫ピン・標本箱？ そんなものを動かないように本当にピン止めできるのか？ その答えは、冒頭に述べた内部に形成される超電導の空間的な不均一性の中にある。

3. ピン止めエネルギー

本来、超電導の中では渦糸は存在しない。超電導体においてはマイスナー効果が本質的であり、

磁場をできるだけ排除しようとする性質がある。渦糸は外部磁場が大きくなってその圧力に耐え切れず、全体の磁場エネルギーを下げるために無理やりクーパー対の海の中に形成されるものだ。そのため渦糸は長さに比例した余分なエネルギー（自己形成エネルギー）を持ち、エネルギーの高い状態にある。ここで超電導体内部に小さな球状の不均一部分がある場合を考えよう。渦糸がすっぽりとクーパー対の海の中にある場合と、渦糸の一部が不均一部分にある場合を比較する。不均一部分は超電導ではないから周回電流は流れず、その部分では渦糸は形成されない。よって渦糸の実質的な長さは短くなっており、渦糸の一部が不均一部分に存在する方が全体的なエネルギーは低くなっている。

ここで、仮想的に渦糸をクーパー対の海から不均一部分を通るように動かすと、渦糸は図 1 に示すようなエネルギーの変化を感じるようになるだろう。これは平らな台の上に置いたボールが穴に落ち込んだような関係に等しい。ボールが穴に落ちたこんだ場合と台の上にある場合のエネルギー差をピン止めエネルギー（ポテンシャルエネルギー）とよび、その空間的な傾きをピン止め力とよんでいる。穴が深く傾きが急峻であればあるほど渦糸をピン止める力が強い。以上より、超電導の場合、渦糸をピン止める虫ピンとは、結晶の中に導入された不均一部分であり、標本箱とは、超電導が発生する舞台である結晶そのものであることがわかるだろう。なお渦糸をピン止める虫ピンに相当するものを、ピン止め点、あるいはピン止め中心とよぶ。

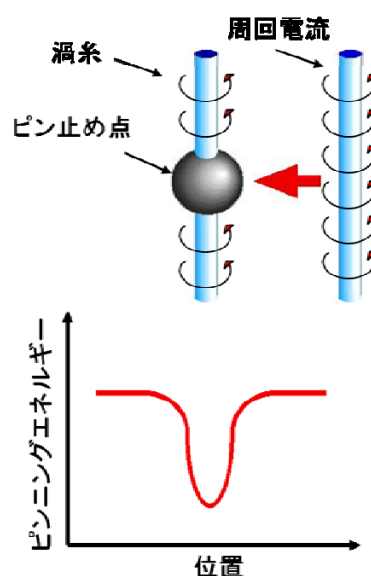


図 1 渦糸を仮想的に動かした時のピン止めエネルギーの変化。

4. 結晶欠陥・格子欠陥

結晶は原子や分子が整然と並んだものだが、一般に配列の乱れである様々な結晶欠陥・格子欠陥、すなわち点欠陥、転位、粒界などを含んでいる。点欠陥は空間的に整然とならんだ原子のうち、ランダムに原子が抜けたり追加されたりすることによって発生する 0 次元的な欠陥であり、結晶構造の局所的な乱れを生み出す。転位とは原子の配列の乱れが一つの線にそって生じている 1 次元的な欠陥であり、途中で途切れることなくその両端部は結晶の表面にまで繋がっている。さらに 2 つの結晶が出会ってできる境界を粒界とよぶ。これは 2 次元的な欠陥である。一般に金属、半導体などの結晶は高温状態にある気体や液体（あるいは固体）を冷却して固体状態にする過程で作製される（金属の場合は塑性加工も加わる）。この間に結晶を空間的に整然と並べることは難しく、小さな結晶が集まった多結晶体となり、同時に多くの欠陥も導入されるのだ。

多結晶体によく似た身近なものが、洗髪したときできるシャボン玉だ。小さな泡が一つの結晶に対応し、泡と泡の境界が粒界であり、小さな泡を吸収して大きなひとつの泡になったものが単結晶だ。ちなみに同じような構造が最近宇宙でも見つかった。それは宇宙の泡構造（ボイドという）の直径は 1 億光年 (10^{23} m) を超え、泡のなかに我々の住むような銀河系はなく、むしろ泡と泡の境界部分である粒界に銀河系の集団が密集しているという。金属の結晶粒界とはサイズは桁違いに異なるが、泡構造もビッグバン後の高温の宇宙からの冷却過程でできた構造であり、われわれの宇宙には階層構造が多々見出されるという点でも注目される。ちょっとこれとは原理的に違うが、似たような存在として、0 次元的な宇宙空間そのものの欠陥である“モノポール”や 1 次元的な欠陥である“宇宙ひも”もいつの日か発見されるのかもしれない。

5. さまざまなピン止め点

さて、少し寄り道したが、様々な欠陥によるピン止めに戻ろう。図 1 に示したように球状の不均一部分として非超電導析出物を想定した。析出物が非超電導状態にあればそこにはクーパー対はなく、磁場を閉じ込める周回電流も生じない。よってその部分の渦糸は途切れたのも同然である。析出物が大きければ大きいほど、実質的な渦糸の長さは短く（ピン止めされる部分が長く）なってピン止めエネルギーは大きくなる。しかし、大きな析出物がたくさん存在するとクーパー対の居場所がなくなり逆に超電導電流が流れなくなってしまう。したがって析出物の大きさは渦糸の直径くらいが丁度いいのだろう。

図 2 に示すように、点欠陥はどうか。これは原子レベルの欠陥であり、渦糸直径よりもかなり小さい。点欠陥の存在によって電子の運動は乱され、局所的に散乱されたりするので超電導も局所的に弱められるだろう。よって渦糸は点欠陥の存在によってピン止め力を感じるようになる（0 次元ピン止め点）。しかし大きなピン止め力は期待できそうにない。転位は点欠陥が直線状に並んだものであり、渦糸が転位にそってピン止めされた場合はそれなりのピン止め力が期待できそう（1 次元ピン止め点）。さらに、結晶粒界は 1 次元の転位が方向をそろえて並び 2 次元面を作ったものだ。したがって渦糸に平行に粒界面が存在する場合は、多数の渦糸を同時に強くピン止めできるかもしれない（2 次元ピン止め点）。実際、粒界近傍にある電子は強く散乱され、粒界でのクーパー対密度も低下することで強いピン止め点として作用することが知られている。金属間化合物の超電導体である Nb_3Sn や近年発見された MgB_2 では粒界が主要なピン止め点であることが確認されている。先述の渦糸直径より大きい析出物は 3 次元的なピン止め点に分類されよう。

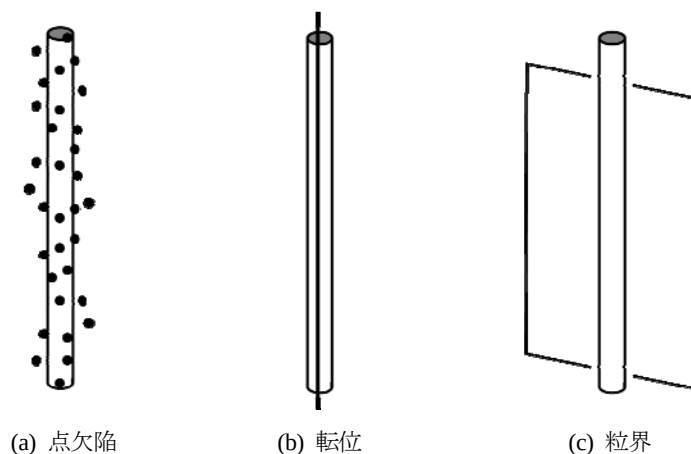


図 2 様々な結晶欠陥による渦糸のピン止めの様子

6. ピン止めにまつわる課題

以上のように渦糸のピン止めを考えると、その次元性が重要であることに気づく。これは渦糸がひも状の構造をしているためである。また、渦糸の本数は外部磁場の強さによって大きく変化する。例えば 1 T の磁場中においては超電導体の断面積 1 cm^2 当たり 483 億本、5 T では 2415 億本もの渦糸が存在することになる。高い臨界電流密度を実現するためには、これだけの膨大な数の渦糸を動かないように強くピン止めする必要がある。ところが厄介なことに渦糸には磁束量子が閉じ込められているため、渦糸間には磁気的な反発エネルギーが働く。さらに厄介なことに 77 K で動作する高温超電導体においては、熱ゆらぎのエネルギーが顕著になる。実はこれらのエネルギーはピン止めエネルギーの効果を弱める方向に働くのだ。こうして超電導体におけるピン止めの問題は多体問

題とよばれる複雑怪奇な問題となり、一筋縄ではいかなくなる。次回以降は粒界にまつわる問題や、ピン止めに関係する問題について考えてみたい。

参考文献:

ピン止め全般の解説として次の文献をあげておく

1. 松下照男「磁束ピンニングと電磁現象」、産業図書（1994）

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 4)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

1986 年の高温超電導体の発見後、多くの研究者や機関がこの分野に参入し、超電導研究は一大ブームの時代を迎えた。特に 1986 年の暮れから 1987 年にかけては、チューらによる $T_c = 93\text{ K}$ の超電導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) の発見で沸き立ち、科学史上、きわめてエキサイティングで稀有な年のひとつとなった。その後も精力的な研究によって次々と新超電導物質が発見され、たちまちにして T_c も 100 K を超えていった。(現在では、特殊な条件下ではあるが、水銀系超電導体で $T_c = 164\text{ K}$ となり、室温の半分の温度にまで到達している。) こうした興奮の中で、すぐにでも液体窒素温度 (77 K) で動作する超電導ケーブルや超電導コイルが実現するのではないかと期待が高まっていた。ところがその後、高温超電導はいくつもの難問を抱えていることが明らかになっていく。つまり T_c は高いものの、さまざまな理由により 77 K における J_c を大きくすることが大変難しく、そのため実用上重要な線材の実現には大きな壁が立ちはだかっていることが分かってきたのだ。難問克服のためには、その後 20 年以上にわたる研究者の地道な努力が必要であった。長年の研究の過程で開発されたのが高度な結晶配向化技術であり、そして本連載の主役である“人工ピン”である。

2. 粒界問題

高温超電導発見からその後の進展は大変早い。チューらの YBCO の論文投稿は 1987 年 2 月であったが、 4.5 K ではあるが 10^6 A/cm^2 を超える高い J_c を持つ YBCO エピタキシャル薄膜の論文投稿が直後の 1987 年の 5 月になされている。一般に YBCO の粉を焼き固めて作った多結晶体の J_c は極めて低い、エピタキシャル薄膜の J_c は高くできる。こうして J_c 向上には粒界を無くすることが重要であることはすぐに明らかになった。

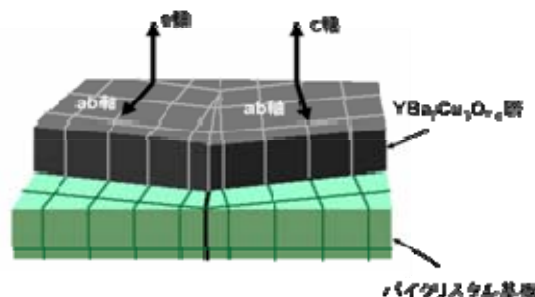


図1 バイクリスタル SrTiO_3 単結晶基板上に形成された YBCO バイクリスタル

粒界と J_c との関係を示したのがディモスらによる YBCO バイクリスタルの実験だった (1988 年)。これは SrTiO_3 単結晶基板を切断して適当な角度ではり合わせて単一の粒界を作り出し、この基板上に YBCO 薄膜を形成することで同様に単一の粒界を持った YBCO バイクリスタルを作する方法だ。図 1 にその模式図を示した。結晶粒 1 と結晶粒 2 は単結晶なので特定の結晶方位を持つ

ており、それぞれの方位のなす角度を傾角という。(傾角が 10～15 度以下を小傾角粒界、それ以上を大傾角粒界とよぶ。) 角度をさまざまに変化させながら、粒界を横切って流れる J_c を測ることで粒界と J_c との関係が分かる (図 2)。図から明らかなように傾角が 5 度以上になると急激に J_c が低下している。多結晶体には多くの粒界がありその角度もランダムで小傾角と大傾角粒界が入り混じっており、その結果として必然的に J_c は低くなってしまふ。こうして、実用的な超電導線材の作製には長尺にわたって粒界がほとんどない線材を作り上げることが必須であることが分かった。これは大きな技術的ブレークスルーを必要とする難問だ。

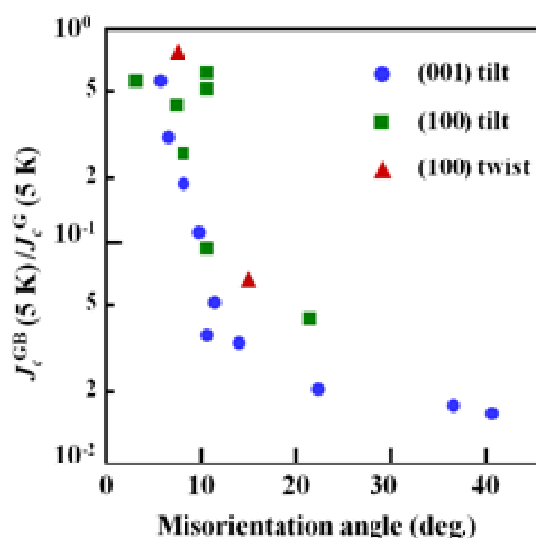


図 2 YBCO バイクリスタルを用いた J_c と粒界傾角の関係

3. 磁束融解とそれに関連する問題

一方、超電導体に磁場を加えると渦糸が形成され、アブリコソフ格子（磁束格子）が形成されることは既に述べた。しかしながら、高温超電導体においても同様にアブリコソフ格子が形成されるが、その振る舞いは、従来の超電導体に比べて大きく異なることが発見直後から次々に明らかになった。1987 年の夏には、 T_c よりもかなり低温側でアブリコソフ格子が融解する磁束融解現象が早くも報告された。1988 年には関連する不可逆磁場の存在や巨大磁束クリープといった現象も報告された。これらは高温超電導体の特異な結晶構造と、 T_c 近傍では大きな熱ゆらぎの影響を受けるために現れたものであり、従来超電導体においては存在しない、あるいは無視できる現象であると考えられた。例えば YBCO は $T_c = 93$ K を持つがその磁束融解は 75 K 近傍で起こるとされた。ビスマス系やタリウム系といったさらに T_c の高い物質では磁束融解は 30 K 当たりで起こるというのだ。

磁束融解が起こるとどのような問題が起こるのか？ それは次のような例を考えれば明らかだ。従来超電導ではアブリコソフ格子は H_{c2} 以下の広い磁場範囲ではっきりと定義できていた。個々の渦糸は磁束量子を持っておりお互いに磁氣的に反発することで三角格子を組む。これをしっかりと編まれたカーペットみたいなものと考えてみよう。床に置かれたカーペットが滑らないようにするためには、端を画鋸で止めてしまえばいい。ところがカーペットが液体のようなものであったらどうだろうか。いうまでもなく画鋸は全く効かないでカーペットは床の上をずるずると流れて行ってしまふはずだ。渦糸、あるいはアブリコソフ格子そのものが運動してしまうと、既に述べたように抵抗が発生してしまう。これは高温超電導体が 77 K では使い物にならなくなることを示している。これも粒界問題に劣らない第一級の難問だ。

4. パーティは終わった？

このような当時の状況を受けて、権威ある米国の科学雑誌「Science」は 1989 年 5 月にある記事を掲載する。それは「Superconductivity: Is the Party Over?」と題する研究ニュースだった。その内容は、磁束融解によってたやすく抵抗が発生してしまうことから、ビスマス系やタリウム系はもとより、YBCO においてもその産業的な展開は大変厳しいと述べたものだった。さらに、もしこのまま T_c が上昇して聖杯である“室温超電導体”が現れたとしても、熱ゆらぎでたやすく渦糸が運動してしまうだろうからゼロ抵抗は実現できないだろう、という教科書で有名なティンカムのコメントまで添えられていた。名だたる一流の研究機関の研究者たちのコメント等が多数添えられ悲観的な内容であったことから、高温超電導に参入した企業や多くの研究者たちに冷水を浴びせる結果となった。この記事にすぐに反論したのが YBCO を発見したチューだった（1989 年 7 月）。超電導の技術的な将来性を考えれば研究を続けるべきであること、また現実には薄膜やバルクで J_c が向上しつつあることを指摘した内容であった。また刺激的すぎるタイトルと研究の進展に対する気短さにも疑問を呈していた。（Science 誌は 1989 年 12 月に同じ執筆者による「Superconductivity: Party Time Again」を掲載し、バルク超電導体の進展について触れるのだが・・・）

ともあれ、Science 誌の記事は刺激的ではあるものの、問題を的確にとらえてはいた。そして同時にその解決策にも触れていた。それは有効なピン止めの導入による融解の抑制であった。1988 年 12 月、すでにフィッシャーによって新しい熱力学的相の存在が理論的に指摘されていた。そして 1989 年には YBCO 薄膜において実験的にこの相、すなわち磁束ガラス相の存在が確認されたのだ。YBCO 薄膜はエピタキシャル成長しているとはいえ、多数の微細な結晶欠陥（酸素欠損、転位、その他の欠陥）が薄膜成長過程で自然に導入されていると考えられる。これらの欠陥が渦糸を草の根的にピン止めすることで、多数の渦糸がからまりあったスパゲッティ（日本ならうどんかそば）のような状態になり、渦糸の運動が凍結されてしまうというのだ。実際に YBCO 薄膜の J_c は当時、77 K で 10^6 A/cm² を超えるようになってきており、ピン止め導入の有効性が理解されるようになっていたのだ。

5. 解決の糸口

ところで、第一の難問の粒界問題はその後どうなったのだろうか。もちろん良く知られているように、最初のブレークスルーは銀シースビスマス線材で実現した。これはビスマス系超電導体が劈開しやすい性質を巧みに利用したもので、77 K での実用超電導線材の実現に成功した。もうひとつの成功例は YBCO コーテッドコンダクターだ。これは高度な結晶配向化技術の賜物であり、最初の突破口はフジクラの飯島による IBAD だ（1991 年）。こちらのサクセスストーリーはこの連載で触れるスペースはないので、Web21 の別の記事を参照した方がいいだろう（「Y 系超電導線材開発の道のり」－その 2）。<http://www.istec.or.jp/web21/series/series2011-1.pdf>

一方、ピン止めに関する新たな進展はほぼ同時期に、別の方向からやってきた。1991 年、シバーレは YBCO 単結晶に高エネルギーのスズイオンを照射して、結晶内部に直径 5 nm の多数のコラムナー欠陥を導入し、その超電導特性を調べた。その結果、 J_c の大幅な増大とともに不可逆磁場の増大も実現したのだ。単結晶に後処理によってコラムナー欠陥というピン止め点を大量に導入したという点で、この手法も一種の人工ピンに数えられるものであろう。この結果は理論家の興味を呼び起こし、磁束ガラス相とは異なる新たな熱力学相、すなわちボーズガラス相の発見の契機となっていく。こうして Science の記事を前後して、高温超電導研究はより多彩さと深みを増し、応用研究に向けて大きく舵を切っていくことになるのだ。次回は、いよいよ本主題である人工ピンの成り立ちについて触れてみたい。

高温超電導に関わる参考書として以下を上げておく。

参考文献：

1. 立木 昌、藤田敏三「高温超電導の科学」、裳華房（1999 年）

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 5)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

1990 年代半ばからの 10 年間は、高温超電導体を用いた線材開発が大きく飛躍する大切な時期であった。この間、先行した Bi 系銀シース線材は臨界電流も大幅に向上し、応用が見渡せる長尺化製造プロセスが確立しつつあった。一方、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) の線材化には粒界問題という大きな壁が立ちはだかっており先が見通せない状態にあった。しかしながら 1 cm サイズの YBCO 薄膜の研究によれば、この物質は本質的に磁場中において高い臨界電流を実現できる潜在力を有していることは分かっていた。そのため、日米を中心とした世界中の研究者たちは 77 K での磁場中応用という夢の実現を真剣に語りつつ、この物質をいかにして長尺化するかそのブレイクスルー技術の確立に心血を注いでいた。YBCO コーテッドコンダクターにとってはまさに産みの苦しみの時代であったが、2000 年を過ぎたあたりから 1 km 級の線材開発がおぼろげではあるが見えてきた。このような背景の元、次の開発ターゲットとして磁場中 J_c の向上が注目されるようになった。そこで登場したのが人工ピン技術である。

2. 人工ピン技術

YBCO は Bi 系に比べて結晶異方性が小さく、磁束の融解温度が高いので 77 K の磁場中での特性に優れていることが知られている。この違いは図 1 に示す結晶構造に由来する。

(Bi 系の方が YBCO に比べて c 軸方向の格子定数が長い。) しかし線材化には YBCO を長尺に渡って均一に形成することが必要であるが、YBCO は Bi 系のように劈開することは難しいため圧延加工が使えない。また粒界問題を除去するためにはどうしても YBCO のエピタキシャル薄膜が必要となる。こうして必然的に金属テープを用いたコーテッドコンダクター形式をとらざるを得ないわけだが、工業的に金属基板上に km 長のエピ膜が作製された例はかつてなく、極めてハードルの高い技術的課題であった。これが YBCO の線材開発に手間取った理由である。しかし、エピタキシャル薄膜を使う手法は多くのメリットも

生んだ。すなわち薄膜は結晶配向性を維持しながら微細な結晶欠陥を導入することに適している。こうして初期に注目されたのは転位や双晶などの格子欠陥であった。2000 年頃には転位が通常の

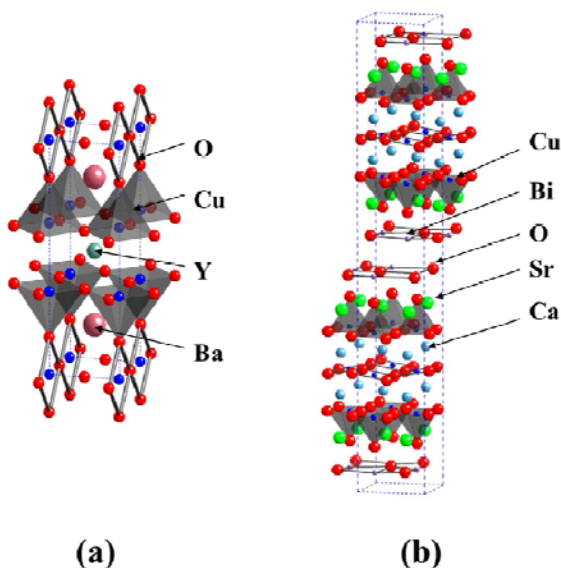


図 1 (a) YBCO と (b) Bi2223 の結晶構造

YBCO 薄膜における有効なピン止めであることはかなりはっきりしてきており、薄膜成長をコントロールして転位密度を増大させることによって J_c の向上が図られたりした。転位の芯の直径 (1~2 nm) は絶対零度でのコヒーレンス長と同等かやや小さいサイズであるが、絶縁体となっており渦糸を強くピン止めできるのだ。

われわれが YBCO に対して人工ピン (artificial pinning center, artificial pin) ということばを使いだしたのは 2002 年頃からであり、論文としては 2004 年に発表したものが最初である。これはあらかじめ基板表面にナノアイランドを形成することで薄膜中に転位を高密度に導入し、YBCO の磁場中 J_c を増大させるものであった。ナノアイランドの面密度を増大させることが J_c 増大に直結しており、人工的な J_c 制御を強く意識したものであった。人工ピンの名称は 1990 年代初頭に、実用 NbTi 超電導線材へのピン止め導入において使われた技術に端を発する。本来、NbTi のピン止め点は加工と熱処理で冶金学的に導入される Ti 析出物であるが、これを Nb に置き換えて線材ビレット作製時に NbTi 中に配置し一緒に加工することで人工的なピン止め導入が可能となっていた。冶金学的な自然にまかせた手法に比べて、よりデザイン性、工学性を強調した名称であった。

一方、2004 年にドリスコルは BaZrO₃ (BZO) を YBCO ターゲット中に混合し、そのターゲットを用いて薄膜形成することで微細な BZO ナノ粒子を YBCO 中に導入した。この手法によって J_c の増大が確認された。我々も同時期に BZO の導入に成功している。また同年、ホーガンは YBCO ターゲットと Y₂BaCuO₅ (211) ターゲットを交互に用いる PLD 法によって微細な 211 相ナノ粒子を YBCO 薄膜中に分散導入することに成功した。これによっても大幅な J_c 向上が報告された。211 相は超電導バルク体のピン止め点としてすでに有名であり、BZO に至っては YBCO 単結晶育成のためにるつぼ材として使用されていたものだ。これらは密度やサイズの調整が可変であり人工ピンと見なすことができる。2003 年~2004 年は人工ピンの萌芽時代でありおよそそのパターンが出そろった。

3. 人工ピンによるピン止めの特徴

人工ピンの特徴は次元性で分類される。すなわち、① 0 次元人工ピン—コヒーレンス長より小さいピン止め点、② 1 次元人工ピン—転位や前述のナノロッドなどの線状ピン、③ 2 次元人工ピン—結晶粒界や大きな析出物の表面、④ 3 次元人工ピン—コヒーレンス長と同等かそれよりも大きなピン、等々だ。現在の人工ピン技術では、②と④が多用されており、これらピン止め点の空間分布や体積分率を設計して YBCO 薄膜の中に形成することが可能となっている。転位は 1 次元ピンであり、BZO も YBCO 薄膜中ではナノロッド状に成長することが確認されている。特にナノロッドは後述するように基板表面に垂直に成長する特徴がある。一方、211 相は粒状で空間的にランダムに分散するため 3 次元的なピン止め点に分類できる。

YBCO エピタキシャル薄膜は通常、結晶構造の c 軸方向が基板表面に対して直方を向いている。転位も 1 次元のピンといえるが、前述のようにその芯の直径は小さい。一方、BZO に代表されるナノロッドは基板表面に垂直で、直径が 6~10 nm あって太い。このためそのピン止めポテンシャルもかなり深いと予想される。ここで渦糸をゴム紐のようなものと考えよう。ゴム紐を引っ張ったり折れ曲げたりするとゴム紐は長くなるのでその分エネルギーが増える。渦糸も同じように考えることができ、増えた分は自己形成エネルギーに相当する。ここで、特に磁場が c 軸に平行に加えられた場合、渦糸はナノロッドと重なる体積 (鎖交体積) は最大となり、渦糸にローレンツ力が加わってもなかなかピン止めから引きはがすことができない。

しかし、図 2 に示すように、磁場をナノロッドから徐々に傾けていくと、渦糸の一部はナノロッドにしっかりとピン止めされているが、それ以外の部分はピンからはずれ、全体的な渦糸の長さも長くなる。また磁場が強い場合は周辺の渦糸から弾性エネルギーによる反発を受ける。さらには、77 K では熱ゆらぎによって渦糸をピン止めからはずそうという力も働いている。こうしてピン止め

のエネルギー、自己形成エネルギー、弾性エネルギーおよび熱エネルギーがバランスすることで渦糸のピン止め状態が決まる。この状態でローレンツ力を加えると、渦糸がナノロッドと鎖交する体積はすでに小さくなっているのでピン止めがはずれやすくなってしまふ。こうして、ナノロッドは c 軸方向に磁場を与えたときに J_c が大きく、角度を傾けるにしたがって J_c は徐々に弱くなっていく。一方、211 相などのナノ粒子の場合（球状とする）、図 2 に示すように渦糸を c 軸から傾けていくと異方性のため渦糸の断面積は円から楕円に変わるが、鎖交する部分の長さは変わらずピン止めエネルギーは異方性分だけ変化する。この場合、異方性は c 軸に垂直な時に最大になるので J_c のピークもその方向に現れることになる。

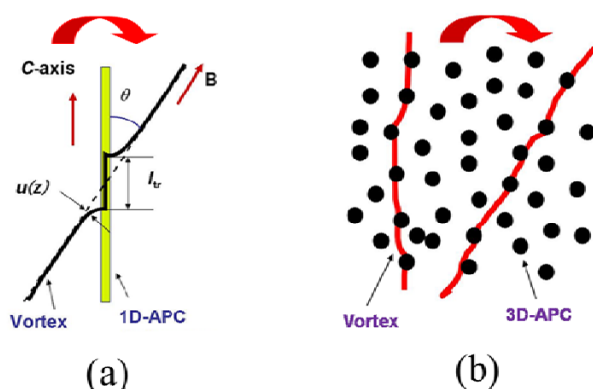


図 2 ピン止めの状態。(a) 1 次元ピン、(b) 3 次元ピン

4. 人工ピンの形成機構

薄膜中にナノロッドが形成される詳しい形成機構については必ずしも明らかにはなっていない。ただし、MOD 法のようなアモルファスからの固相エピタキシャル法では、粒状ピンは観察されているがロッド状ピンの形成は難しい。基本的に固相法は、結晶成長のフロント部に大量の原料がすでに存在する濃厚環境下において熱平衡に近い環境でゆっくりと成長する方法である。このため MOD 法で YBCO への BZO の導入が試みられているが、YBCO と混ざり合うことはなく独立に結晶化し薄膜中にナノ粒子として分散する。一方、PLD 法や MOCVD 法などの気相蒸着法によれば、作製条件や物質を選択することでロッド状ピンと粒状ピンの作り分けが可能だ。気相法で YBCO やピン止め物質原料を供給すると基板表面にそれら構成原子からなる希薄環境が形成され、徐々に薄膜に取り込まれて薄膜成長が進む。ピン止め物質をナノロッド状に成長させるためにはその成長のカイネティックスの理解が重要だ。たとえば BZO は、Ba をふくむペロブスカイト構造を有し、YBCO の結晶構造によく似ていて化学的親和性が高い。このような物質は YBCO と親和性を保ちながら薄膜成長時に取り込まれ、異方的な界面エネルギーや歪エネルギーを最小化する方向に成長することでナノロッド状になっていく。一方、 Y_2O_3 などは結晶構造も大きく異なり、界面エネルギーも等方的で YBCO の中ではナノ粒子状に成長する。温度や原料供給速度も重要であり、健全で真っ直ぐなナノロッドの形成のためには成長条件の細かな調整も必要とされる。現在では、一方向に成長したナノロッド利用は太陽電池材料における量子ドットや、磁性と誘電性を兼ね備えたマルチフェロイック材料においても見ることができる。

5. その後の展開

ナノロッドやナノ粒子を用いた人工ピンの研究報告は、2005 年頃から急に増え、現在でも活発に議論されている。超電導研究の中でも、渦糸のピン止め分野は基礎から応用に直結しており、大変

興味深い領域であるとともに最も重要なものの一つだ。超電導体の中にデザインしたナノ構造を導入し、その結果として J_c が大きく引き上げられることを知ると、さらに工夫をして性能を引き出そうとする。現在では次元の異なる人工ピンを導入して J_c の理論的限界に向けた挑戦も始まっている。人工ピン技術は、開発者の具体的なイメージを超電導性能に直結させるための工学的なツールであり、また未解明の磁束物理の開拓のためのツールとなりうる可能性も秘めている。

次回、最終話では、人工ピンの線材応用と将来展望について述べる。

参考文献：

人工ピンの現状を記したものとして以下をあげておく。

1. 松本 要, "ナノテクで量子化磁束を制御する—人工ピンの導入—", 応用物理 77, pp. 19, 2008.

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい人工ピンのおはなし (その 6)

九州工業大学
大学院物質工学専攻
教授 松本 要

1. はじめに

本連載「やさしい人工ピンのおはなし」も 6 回目を迎え最終回となった。連載の途中でセルン (CERN) の LHC という史上最大の素粒子加速器を用いた高エネルギー実験についてふれたが、2012 年夏、ついにヒッグス粒子と思われる新粒子発見の報が新聞紙面を賑わした。二つの検出器グループが独立にほぼ同じエネルギーを持つ新粒子の存在を確認したのだ。LHC では最新の超電導技術が用いられており、超電導の貢献なくして新発見はあり得なかっただろう。LHC はまだ稼働したばかりであるが、今回の新粒子発見はさらに高エネルギー側に未知の粒子が存在する可能性を示唆しているという。つまり物理的に興味深いエネルギー領域が現在の技術の手の届く範囲内で広がっている可能性があるのだ。LHC では磁場強度を 16~20 T に増大させて、最大エネルギーを現状の 5~10 倍にまで引き上げる次期計画の検討をすでに始めている。そこでは高温超電導の利用が不可欠となる。本連載の人工ピン技術も性能向上において一役買うことになるかもしれない。

今回の最終話では人工ピンの線材への応用と展望、および今後の人類社会発展の鍵を握るとされる超電導技術の未来について考えてみたい。

2. 人工ピンの応用

これまでの連載で示したように人工ピンは高温超電導体の J_c 制御の基本技術として花開きつつある。高温超電導体は種々の理由から、最大の J_c を実現するためにはエピタキシャル成長した薄膜形態が最も有効であることが分かっている。量子化された渦糸は超電導体中の結晶欠陥や非超電導相によってピン止めされる。このときピン止め点の密度や空間分布を工学的に設計して超電導体に導入することが重要だ。人工ピンのサイズは小さすぎても大きすぎてもいけないし、また少なすぎても多すぎてもいけない。サイズや空間分布を適切に調整した人工ピンを高温超電導体に導入するには薄膜技術は適している。高温超電導薄膜がエピタキシャル成長するプロセスにおいて、人工ピンとなりうる非超電導物質等を薄膜に導入することで、自己組織化したナノロッドやナノ粒子等を様々なパターンで分布させることができるのだ。

すでに、YBCO 高温超電導薄膜を用いたコーテッドコンダクターでは種々の人工ピンを導入した線材開発が進んでいる。最も進んでいるのは IBAD (ion-beam assisted deposition) 基板や RABiTS (rolling assisted biaxially textured substrate) 基板を用いた YBCO コーテッドコンダクターへのナノロッド導入だろう。ピン止め物質としては BaZrO_3 、 BaSnO_3 あるいは BaHfO_3 などが用いられており、ナノロッド形成にはパルスレーザ蒸着法や MOCVD 法などの気相法が有効だ。一方、ナノ粒子としては Y_2O_3 や BaZrO_3 などが利用され、こちらは MOD 法や電子ビーム蒸着法で YBCO プリカーサ膜を作る段階で予め導入しておき、後熱処理でエピ成長させる時に薄膜中にランダム分布させる。これら人工ピンの効果は大変顕著で、人工ピンなし (つまりピン止め点は自然に導入された転位や双晶など) の場合に比べ 77 K の磁場中において 3~10 倍も J_c が増大する。これらの試料をより低温側、例えば 20~40 K で測定すると従来の金属系超電導線材の 10 倍以上も大きな磁場中 J_c が得られ、高温超電導の面目躍如たるものがある。

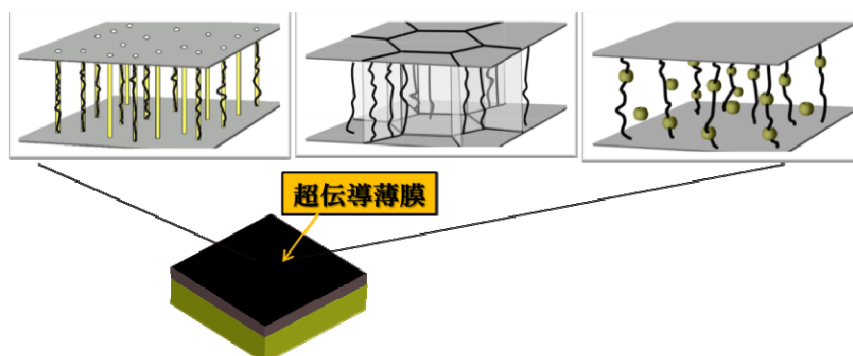


図 1 超電導薄膜に導入した各種人工ピンの例

しかし現在の人工ピン技術は始まったばかりであり発展の余地は大いにある。例えば、ナノロッドとナノ粒子のいいとこ取りをした人工ピンのダブルドープ技術は検討すべき課題の一つだ。ナノロッドに加えてナノ粒子をわずかに添加することで、ナノロッドだけでは達成できなかった高磁場側の J_c が実現できるという報告もある。また、現在の人工ピンは主に 77 K 応用を目指して開発されてきた。そのため、 T_c 劣化を起こさない程度の量（体積分率で数%程度）の導入が主に検討されてきた。しかしあまりにも 77 K と T_c が近いことから、本来の人工ピンの性能を十二分に引き出せていない可能性もある。よって T_c が高く、より温度マージンの大きな高温超電導物質の開発も必要となるであろう。また逆に、より低温での利用、例えば 4~20 K 近傍を考えると T_c 劣化の影響はそれほど問題にならないかもしれない。この場合理論的には 20~25 % の人工ピン導入が有望となり、結果としてさらに数倍~10 倍の磁場中 J_c 増大も可能かもしれない。このような J_c を持つ高性能線材は各種電力・輸送応用はもとより、未来の超強磁場加速器コイルのような様々な大型応用に適用されるだろう。

3. 超電導は限界をこえるか?

超電導体の発見から最初の 1 世紀が、そして高温超電導体の発見から最初の 1/4 世紀が過ぎ去った。現在の超電導の T_c 到達点は、水銀系高温超電導体の高圧下での 164~166 K が最高であり、グラファイト表面の室温超電導の可能性などが報告されてはいるものの、その後より高い T_c の報告はない。多くの研究者は、より高い T_c の超電導物質は存在するもののまだ発見されていないという立場を取っている（と思う）。確かに YBCO 超電導体やビスマス系超電導体が理想的な化学量論比ですでに自然界のどこかで存在していたかどうかは疑わしい。すなわちこれらの化合物は人間の手によって初めてこの世に生み出された可能性が高いのだ。この観点からすれば、近い将来、人為的な手段によってより高い T_c を持つ物質が創造される可能性は十分にあるはずだ。

理論家としても有名なミチオカクは彼の啓蒙書の中で、20 世紀は電気の時代の始まりであったが、21 世紀末は室温超電導の発見によって磁場の時代の始まりになるという。未来の道路網には超電導コイルが敷かれ、人や車も磁場によって浮上し高速移動することができる。摩擦やエネルギー損失のない時代の幕開けである。室温超電導体がどのようなものであるか現時点では予想が困難であるが、これまでの超電導発見の歴史から第二種超電導体である可能性が高い。重量物を浮上させるほどの力を発揮するには、渦糸は固くかつ渦糸の中心部分にはクーパー対の存在しない穴がしっかりと開いていることが必要だ。そうであれば本連載の人工ピンも効果的なピン止めとして十分な機能を発揮できよう。

金属系超電導体は BCS 理論によって理解できたが、高温超電導体をうまく説明できる理論はま

だ確立していないと言われる。これは高温超電導体では電子間に働くクーロン力が大きいいため摂動論が使えず理論的な取り扱いが難しいからだ（強相関電子系と呼ばれる）。このような理由もあって室温超電導に至る予測は現在でも困難となっている。しかし解決策は予想外の方向からやってくるかもしれない。それはゲージ重力対応と呼ばれる深淵な意味を持つ理論的枠組だ。この考えは強く相互作用する粒子系の解析が重力理論を用いて調べることができると主張する。実際、重イオン衝突加速器 RHIC で行われた「クォーク・グルーオン・プラズマ」という強い相互作用の実験結果がゲージ重力対応による予測と見事に一致したという実績がある。それ以来、この枠組みを高温超電導のような凝縮系に適用しようという試みが始まっている。もしこの方法で強相関にある高温超電導が理解できれば、「超電導（BCS）→素粒子物理（高エネルギー物理）→超電導（コイル）→素粒子・・・」というお互い刺激し合う良い循環が続くことになる。そういう意味でも今後の展開に大いに期待したい。

4. 超電導技術と未来

ここでは期待される未来の超電導技術の役割について述べてみたい。現在は世界中で化石エネルギーの消費が増大しており、二酸化炭素排出量の増大とともに、燃料枯渇の不安が高まってきている。2008 年の世界中の全エネルギー消費量はワット換算で 15 TW と見積もることができる。未来のエネルギー消費量を予測するのは難しいが、世界の GDP とエネルギー消費が比例するならば算出も可能だ。仮に世界の経済成長率を年率 3 % として今後 50 年間続くとすれば $1.03^{50} = 4.4$ となり 4 倍以上のエネルギー消費量 (61 TW) となる。これは現在の技術でとても賄いきれるものではない。原子力には廃棄物の問題があり、また地上の風・波によるエネルギー資源は 350 TW、地熱は 23 TW くらいであり、環境に影響を与えずこれらを利用するには限界がある。

したがって最終的な答えはやはり核融合となるだろう。それもふたつのオプションがある。宇宙の核融合と地上の核融合だ。太陽（核融合）から地球面積にそそぐエネルギーは 174,000 TW あり、砂漠に十分な数の太陽光発電システムを配置して世界中に超電導ケーブルで供給するという GENESIS 計画は有名だ。地上の核融合においても超電導強磁場コイルを使って高温のプラズマを制御する ITER 計画が進んでいる。ここでは 3 重水素の反応 $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$ （中性子）を用いるが、将来的にはヘリウムの同位体を用いる $^2\text{H} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p$ （陽子）の方が有利だ。放出される高エネルギー中性子より高エネルギー陽子の方が扱いやすく格段にクリーンなためだ。月面には太陽風で運ばれてきた ^3He が豊富にあり、25 トンの ^3He 燃料を運んでくれば米国の 1 年間分のエネルギーを賄うことができるという。

月面ではルナリングという計画もある。月赤道上に幅 400 km の太陽光発電システムをリング状に敷き詰めて超電導ケーブルで接続し、集めた電力をマイクロ波などで地球に送るという壮大な計画だ。太陽光は月面では安定で地上に比べて効率は格段にいい。これは宇宙太陽光発電の月面版といえる。さらに宇宙利用では VASIMIR というプラズマ推進ロケットの研究も進められている。これは高温のプラズマを超電導強磁場コイルで絞って推力として利用するもので長期間の加速を可能とし、火星まで数週間で行けるという優れた惑星間宇宙機だ。核融合技術の応用でもある。

このように改めて見直してみても、未来の超電導技術には活躍の場が多数用意されている。超電導技術は今世紀中に切り札の技術として花開くのだろう。

5. おわりに

電子がある温度以下でペアを組んで集団的に振る舞う超電導という現象が自然界の低温領域に用意されていたことに不思議さを感じる。しかしながら粒子がペアを組んでエネルギーを下げる類似の機構は超高温・高密度の中にも見いだせ、宇宙の中では実はごくありふれた現象なのかもしれない。中でもわれわれに身近な超電導現象を理解し使いこなすことが、将来の人類が抱える諸問題を

解決する鍵でもある。切り札技術としての超電導の今後の発展に大いに期待したい。

参考文献：

1. ルナリング構想は <http://www.shimz.co.jp/theme/dream/lunaring.html>
2. VASIMIR は http://www.nasa.gov/vision/space/travelinginspace/future_propulsion.html

[超電導 Web21 トップページ](#)